

알칼리 자극제의 종류 및 첨가율에 따른 무시멘트 경량 경화체의 강도특성

Strength Properties of Alkali-Activated Lightweight Composites with Alkali Activators of Different Types and Amounts

이 상 수¹

김 윤 미¹

박 선 규^{2*}

Lee, Sang-Soo¹

Kim, Yun-Mi¹

Park, Sun-Gyu^{2*}

Department of Architectural Engineering, Hanbat National University, Yuseong-Gu, Daejeon, 305-730, Korea ¹

Department of Architectural Engineering, Mokwon University, Seo-Gu, Daejeon, 302-729, Korea ²

Abstract

In order to reduce the emission of carbon dioxide(CO₂), this research use blast furnace slag in concrete manufacture, as 100% replacement of cement. The aim of this study is to investigate the density and strength properties of alkali-activated lightweight composites with alkali activators of different types and different amounts. The bubble for achieving the lightweight of alkali-activated lightweight composites was generated in the reaction between the paper ash and the alkali activators instead of using a foaming agent. Lightweight formed concrete was conducted basic experimental for determining replacement ratio of paper ash. Then, the density and strength were measured according to the types and the contents of the alkali accelerator that can react with the paper ash. As results, the optimum replacement ratio of the paper ash was 5%. The alkali activator containing NaOH 12.5% obtained the lowest weight of 1.13g/cm³. Also, compressive strength were relatively high. Therefore, this study demonstrated that alkali accelerator with a certain amount of NaOH can achieve relatively high strength and lightweight alkali-activated lightweight composites.

Keywords : blast furnace slag, paper ash, alkali activator, alkali-activated lightweight composites

1. 서 론

1.1 연구의 배경

일반적으로 기포 콘크리트에 있어서, 콘크리트의 밀도를 감소시키기 위하여 시멘트 페이스트에 별도의 발포제를 사용하여 경화체 내부에 공극을 도입하는 방법을 사용하고 있다. 이러한 기포 콘크리트는 경량 패널의 심재, 충전재

등의 단열용을 많이 사용하고 있다[1]. 하지만 기포 콘크리트를 구성하고 있는 재료인 시멘트는 석회석을 소성하여 만든 재료이고, 소성과정 중에 다량의 CO₂를 발생시키기 때문에 이를 대체할 수 있는 재료가 필요한 실정이다[2]. 시멘트 대체재에 대한 연구는 산업부산물물을 기반으로 한 결합재에 대한 것으로 그 중 고로슬래그에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 아직까지 고로슬래그를 100% 사용하는 연구는 미흡한 실정이다[3,4,5].

한편, 제지에서는 제지공정에서 발생하는 슬러지를 소각하여 발생한 폐기물로 연간 발생량은 계속하여 증가하고 있다. 이러한 제지에서는 대부분 해양배출, 매립 등의 방법으로 처리되고 있어 환경문제를 야기시키고 있기 때문에 제지에서를 재활용하기 위한 연구가 절실히 필요한 실정이다[6].

Received : January 15, 2014

Revision received : March 18, 2014

Accepted : April 24, 2014

* Corresponding author : Park, Sun-Gyu

[Tel: 82-42-829-7712, E-mail: psg@mokwon.ac.kr]

©2014 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

1.2 연구의 목적

본 연구는 포틀랜드 시멘트를 전혀 사용하지 않는 경량 패널의 심재 및 충전재를 개발하기 위해 산업부산물인 고로슬래그를 기반으로 별도의 발포제를 사용하지 않고 제지에서와 알칼리 자극제만으로 기포를 발생시켜 무 포틀랜드 시멘트 경량 경화체를 제조하여 기포콘크리트의 기초 물성 즉, 경량성과 강도특성을 검토하고자 하였다. 이를 위해 기초실험을 통하여 제지에서시의 적정 치환율을 도출한 후 알칼리 자극제의 종류 및 첨가율에 따른 실험을 실시하여 무시멘트 경화체의 밀도 및 강도 특성을 분석하였다. Figure 1은 본 연구에 있어서 무시멘트 경량 경화체 제조를 위한 고로슬래그, 제지에서 및 알칼리 자극제의 기포생성 반응모식도를 나타낸 것이다.

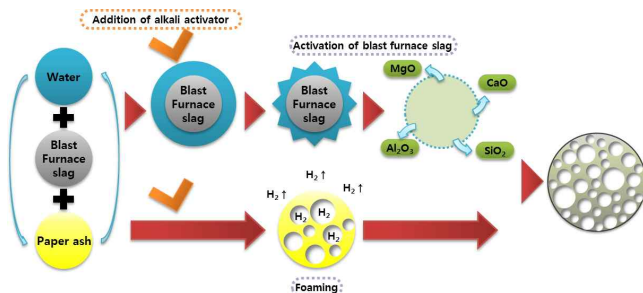


Figure 1. Schematic diagram of bubble formation reaction of Blast furnace slag, paper ash and alkali activator

2. 기초 실험계획 및 분석

본 연구에서 실시한 기초실험은 무시멘트 경량 경화체를 제조하기 위해 고로슬래그와 제지에서시의 적정비율을 검토하기 위한 실험이다. Table 1은 실험요인 및 수준을 나타낸 것으로, 결합재로는 고로슬래그와 제지를 사용하였으며, 결합재 조건으로써 고로슬래그의 질량에 제지에서 치환율을 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30(wt.%) 등 총 7수준으로 설정하였다.

알칼리 자극제는 NaOH를 결합재 질량에 17.3(wt.%) 첨가하였으며, W/B는 39%로 고정하였다. 시험 항목은 밀도와 압축강도로 설정하였다.

Table 2는 사용재료의 밀도와 사용된 양을 기준으로 도출한 단위용적질량, 경화체의 실제무게와 부피를 측정하여 도출한 겉보기 밀도, 단위용적질량에서 겉보기 밀도로 감소된 양의 척도로서 감소율을 나타낸 것이다. Plain의 겉보기

밀도가 1.92g/cm³로 감소율 4.09%를 나타내었고, 제지에서시의 치환율이 5%인 경화체는 39.37%, 10%인 경화체는 41.66%로 10% 치환한 경화체의 감소율이 가장 컸으며, 그의 겉보기 밀도는 1.12g/cm³로 나타났다. 또한, 제지에서시 치환율 10%까지 겉보기 밀도가 감소하는 경향을 나타내고 있으나 이후 치환율이 증가할수록 겉보기 밀도가 증가하였다.

Table 1. Basic experimental plan

Experimental factor	Experimental level	
Binder	· Blast Furnace Slag, Paper Ash	2
Replacement ratio of paper ash	· 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 (wt.%)	7
Alkali activator	· NaOH	1
Addition ratio of alkali activator	· 17.3 (wt.%)	1
W/B	· 39%	1
Curing conditions	· Relative humidity (80±5)% · Temperature (20±2)°C	1
Test items	· Density, Compressive strength	2

Table 2. Density according to mixing ratios of paper ash and blast furnace slag

Mixing ratio of paper ash	Unit volume weight (g/cm ³)	Bulk specific gravity (g/cm ³)	Decreasing ratio ^{a)} (%)	
Plain	0	2.00	1.92	4.09
B95/P5	5	1.91	1.16	39.37
B90/P10	10	1.91	1.12	41.66
B85/P15	15	1.91	1.21	36.72
B80/P20	20	1.91	1.23	35.26
B75/P25	25	1.90	1.17	38.31
B70/P30	30	1.90	1.17	38.31

a) Decreasing ratio : [(Unit volume weight-Bulk specific gravity)/Unit volume weight]×100

Figure 2는 제지에서시의 치환율에 따른 경화체의 압축강도를 나타낸 것으로 Plain의 압축강도는 24.0MPa로 가장 높았으며, 제지에서시를 치환하였을 경우 Plain 강도의 1/4 수준으로 감소하였다. 이는 제지에서시와 알칼리 자극제의 반응으로 수소기체가 발생하고 공극이 다량 발생하여 나타난 결과로, 제지에서시의 치환율에 따라 강도는 상이하게 나타났다. NaOH를 5% 치환한 경화체의 재령 28일 압축강도는 6.8MPa로 재령일에 따라 강도가 증가하는 반면 10~30%

치환한 경화체는 재령 7일보다 28일의 강도가 보다 낮은 압축강도를 나타내었다. 이는 반응 초기 즉, 종결 이전에 수소기체가 모두 발생되지 않고 재령일에 따라 수소기체가 일부 발생하여 굳은 페이스트 결합재가 팽창압에 의해 균열이 발생되어 나타난 결과인 것으로 판단된다.

따라서, 본 실험의 제지에서 치환율은 기초실험의 결과를 토대로 겉보기 밀도와 압축강도를 비교하여 낮은 겉보기 밀도와 높은 강도발현 및 안정적인 강도증진을 나타낸 치환율 5%로 선정하였다.

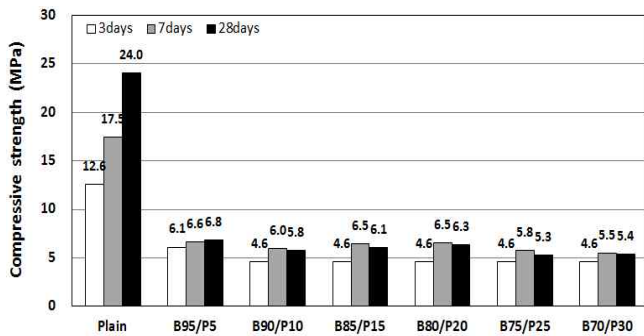


Figure 2. Compressive strength according to mixing ratios of paper ash and blast furnace slag

3. 본 실험계획 및 방법

3.1 실험계획

Table 3은 본 실험계획을 나타낸 것으로, 기초실험 결과를 토대로 하여 고로슬래그 기반 결합재에 제지에서 치환율을 5 (wt.%)로 고정하였다. 알칼리 자극제는 제지에서와 반응하여 수소기체를 발생시킬 수 있는 KOH, Ca(OH)₂, NaOH 등으로 선정하였으며, 이의 첨가율을 2.5, 7.5, 12.5, 17.5, 22.5, 27.5, 32.5, 37.5(wt.%) 등 총 8수준으로 설정하였다. W/B는 기초실험보다 높은 40%로 고정하였으며, 습도 80±5%, 온도 20±2°C의 항온항습 조건에서 양생을 실시하였다. 시험 항목은 굳은 경화체의 강도 특성을 검토하기 위한 압축강도를 측정하였으며, 제지에서 발포 성능에 의한 경량화 척도로써 겉보기 밀도를 측정하였고, 기포발생 시기와 정도를 측정하기 위하여 경량 경화체의 단면형상을 관찰하였다.

3.2 사용재료

본 실험에서 사용된 고로슬래그는 SiO₂와 CaO, MgO,

Al₂O₃가 주성분이며, 밀도 2.91g/cm³, 분말도 4,464cm²/g인 3종을 사용하였다. 제지에서는 국내의 제지 공장에서 발생하는 제지슬러지를 소각처리한 후 폐기하는 것을 사용하였으며, 밀도는 2.70g/cm³, 분말도는 3,600cm²/g인 것을 사용하였다. 알칼리 자극제는 분말형태의 KOH, Ca(OH)₂, NaOH 등을 사용하였다. KOH의 밀도는 2.04g/cm³이며, 순도 95%인 것을 사용하였다. Ca(OH)₂의 밀도는 2.24g/cm³이며, 순도 95%인 것을 사용하였다. NaOH는 순도는 98%이고, 밀도는 2.13g/cm³이다. 사용재료의 화학성분은 Table 4에 나타내었다.

Table 3. Experimental plan

Experimental factor	Experimental level	
Binder conditions	· BFS ^{b)} +PA ^{c)}	1
Replacement ratio of paper ash	· 5 (wt.%)	1
Alkali activator	· KOH, Ca(OH) ₂ , NaOH	3
Addition ratio of alkali activator	· 2.5, 7.5, 12.5, 17.5, 22.5, 27.5, 32.5, 37.5 (wt.%)	8
W/B	· 40%	1
Curing conditions	· Relative humidity (80±5)% Temperature (20±2)°C	1
Test items	· Density, Compressive strength	2

b)BFS : Blast Furnace Slag
c)PA : Paper Ash

Table 4. Chemical component of using materials

Using materials	Chemistry components (%)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
BFS	34.39	14.47	0.63	41.67	6.49	-	0.36	1.20	-
PA	13.00	10.10	0.90	65.70	4.40	1.70	-	-	0.40

3.3 실험방법

본 실험의 비빔방법은 고로슬래그와 제지를 믹서에 투입하여 저속으로 60초 동안 건비빔을 실시한 후 알칼리 자극제와 배합수를 혼합한 후 하루 동안 안정시킨 용액을 첨가하여 같은 속도로 60초 동안 비빈 뒤 30초 동안 고속으로 비빈 후 토출하였다.

고로슬래그 기반 무시멘트 경량 경화체의 겉보기 밀도 측정을 위한 공시체는 기포 콘크리트의 겉보기 밀도, 함수

율, 흡수율 및 압축강도 시험방법(KS F 2459)에 의거하여 지름 100mm, 높이 200mm의 원기둥형으로 제작하였으며, 이를 재령 28일까지 양생한 후 무게와 부피를 측정하여 겉보기 밀도를 계산하였다. 압축강도를 측정하기 위한 공시체 제작은 시멘트의 강도 시험방법(KS L ISO 679)에 의거하여 40×40×160(mm)의 몰드를 제작한 후 페이스트를 채운 뒤 기포 발생이 정지될 때까지(약 24시간) 기건양생을 한 후에 상대습도 80±5%, 온도 20±2℃의 항온항습 조건에서 양생하였으며, 이를 재령일에 맞추어 강도를 측정하였다.

4. 본 실험결과

4.1 무시멘트 경량 경화체의 발포 및 밀도특성

Table 5는 알칼리 자극제의 종류 및 첨가율에 따른 경화체의 발포 및 밀도 측정 결과를 나타낸 것으로, 알칼리 자극제의 종류에 따라 기포발생 시기가 달랐으며, 첨가율에 따라 기포의 양이 다르게 발생되었다.

KOH를 첨가한 경우의 기포발생 시기는 비빔과정 중 배합수를 투입하고 저속으로 비비는 과정에서 부터 발생하며, 첨가량에 따라 기포 발생량의 차이가 나타났다. 이는 겉보기 밀도로 나타낼 수 있는데, 첨가율 17.5%인 경우에 겉보기 밀도 1.13g/cm³, 감소율 40.61%로 가장 낮은 겉보기 밀도를 나타낸 것으로 보아 기포가 가장 많이 발생하였으며, 첨가율 17.5%까지 경화체의 겉보기 밀도가 감소하는 경향을 나타내었고 이후 증가하는 경향을 나타내었다.

Ca(OH)₂를 첨가한 경우 결합재를 비빈 후 몰드에 토출한 후에야 기포가 발생하기 시작하였다. 이는 KOH와 NaOH보다 늦은 반응을 한 것으로 기포의 발생량도 첨가율 2.5%의 경화체가 겉보기 밀도 1.74g/cm³로 가장 낮은 값을 나타내나 감소율은 7.74%로 소량 감소하였다. 또한, 자극제의 첨가율에 따라 단위용적질량이 증가하는데, 사용재료의 단위중량 증가에 의한 것으로 판단된다.

NaOH를 첨가한 경우는 KOH와 유사한 경향을 나타내었으며, 기포 발생 시기도 유사하였다. 하지만 더 적은 자극제의 양으로 기포가 다량 발생하여 겉보기 밀도가 감소하였다. 그 양은 첨가율 12.5%로 겉보기 밀도 1.13g/cm³, 감소율 40.45%이다.

Figure 3, 4 및 5는 제지에서와 알칼리 자극제의 반응으로 형성된 공극을 관찰하기 위한 경화체의 단면형상을 나타

낸 것으로 KOH의 경우 첨가율 2.5%는 육안으로 관찰되는 공극은 크게 보이지 않았고 12.5%를 첨가하였을 경우 일정한 형태가 없고 불규칙한 형상을 나타내었으며, 국부적으로 많은 기포가 발생되어 기포막이 중첩되어 결합된 형상인 공극이 관찰되었다. 22.5%를 첨가한 경화체는 공극이 고루 분포되지 않고 육안으로 관찰되지 않는 부분이 일부 나타났다. 32.5%를 첨가한 경화체는 미세한 공극이 형성되어 있지만 종결 이후에도 발생하는 수소기체의 팽창압에 의한 균열이 관찰되었다.

Table 5. Density according to types of alkali activator

Division	Unit volume weight (g/cm ³)	Bulk specific gravity (g/cm ³)	Decreasing ratio (%)	Time of bubble occurrence	
KOH	2.5%	1.88	1.59	15.62	After the water was put
	7.5%	1.89	1.25	33.97	
	12.5%	1.89	1.21	35.84	
	17.5%	1.90	1.13	40.61	
	22.5%	1.90	1.13	40.45	
	27.5%	1.90	1.19	37.47	
	32.5%	1.91	1.17	38.57	
	37.5%	1.91	1.26	34.15	
	Ca(OH) ₂	2.5%	1.88	1.74	
7.5%		1.89	1.76	6.92	
12.5%		1.90	1.78	6.38	
17.5%		1.91	1.80	5.80	
22.5%		1.92	1.81	5.87	
27.5%		1.93	1.83	4.95	
32.5%		1.94	1.87	3.68	
NaOH	2.5%	1.88	-	-	After the water was put
	7.5%	1.89	1.16	38.64	
	12.5%	1.90	1.13	40.45	
	17.5%	1.90	1.22	35.93	
	22.5%	1.91	-	-	
	27.5%	1.92	-	-	
	32.5%	1.92	-	-	
37.5%	1.93	-	-		

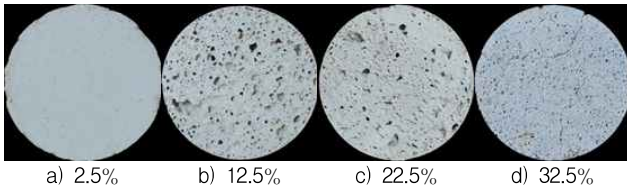


Figure 3. Cross-sectional shape of matrix according to addition ratios of KOH

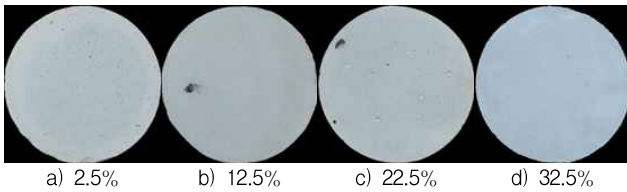


Figure 4. Cross-sectional shape of matrix according to addition ratios of Ca(OH)₂



Figure 5. Cross-sectional shape of matrix according to addition ratios of NaOH

Ca(OH)₂를 첨가한 경화체는 비빔과정 및 경화체 성형과정에서 생성된 공극은 관찰되었으나 제지애시와 Ca(OH)₂의 반응으로 형성된 공극은 첨가율과 상관없이 육안으로 관찰할 수 없을 정도의 크기로 발생하였다.

NaOH를 12.5% 첨가한 경화체는 형성된 공극의 크기 차이는 다소 있지만 대부분 구형으로 형성되어 있는 것을 확인 할 수 있었다. 반면 22.5%를 첨가한 경화체는 KOH를 12.5% 첨가한 경화체의 단면형상과 유사하게 국부적으로 결합된 공극이 관찰되었다.

4.2 무시멘트 경량 경화체의 강도특성

Figure 6은 KOH의 첨가율에 따른 압축강도를 나타낸 것으로 겉보기 밀도와 마찬가지로 첨가율 17.5%까지 강도가 저하하는 경향을 나타내었으며, 이후 강도가 증가하였다. 이는 비빔과정중에 발생하는 기포가 자극제의 사용량이 많아짐에 따라 초기에 많은 기포가 발생되고, 이에 따라 결합재 외부로 기포가 빠져나와 실제 몰드에 토출하였을 때 결합재 내에 갇혀있는 기포의 양이 줄어들어 나타난 결과인 것으로 판단되며, 결합재 내에 가장 많은 기포를 내포할 수 있는 전환점은 첨가율 17.5%인 것으로 사료된다.

또한, 첨가율 7.5%인 경화체는 겉보기 밀도 1.25g/cm³, 재령 28일의 압축강도 4.3MPa를 나타내는데, 첨가율 37.5%인 경화체는 7.5%와 유사한 겉보기 밀도 1.26g/cm³를 나타내나 재령 28일의 압축강도는 3.7MPa로 나타났다. 이는 매우 미미한 차이지만 첨가율 12.5%의 겉보기 밀도가 1.21g/cm³인 것에 비해 압축강도가 4.0MPa인 것을 보았을 때, 알칼리 자극제의 과다사용은 발생하는 수소기체의 팽창압에 의한 균열과 기존 연구결과[3]에서 나타난 것과 같이 K⁺의 잔존으로 인한 결합력 저하로 무시멘트 경량 경화체의 압축강도를 저하시킨 것으로 판단된다.

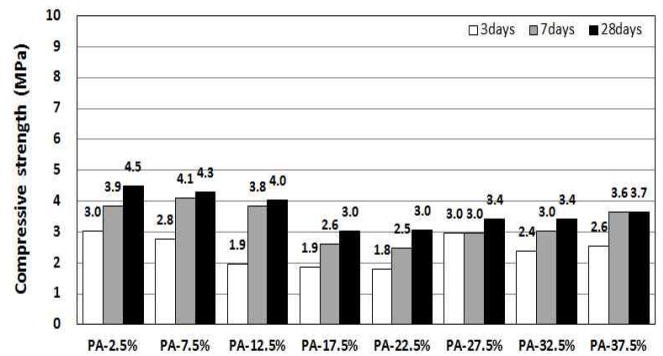


Figure 6. Compressive strength according to addition ratios of KOH

Figure 7은 Ca(OH)₂의 첨가율에 따른 경화체의 압축강도를 나타낸 것으로 Ca(OH)₂의 첨가율이 높아질수록 압축강도는 증가하는 경향을 나타내었으며, KOH와 NaOH와 달리 재령 7일에서 28일로의 강도증진이 큰 것으로 나타났다. 이는 Ca(OH)₂에 의해 고로슬래그가 활성화하여 강도를 발현한 것이며, Ca(OH)₂의 이온화도가 낮아 초기에 고로슬래그와 반응하는 양이 적고, 이후 고로슬래그의 CaO 등에 강도가 발현된 것으로 판단된다.

또한, 육안으로 관찰되는 균열이 없는 것으로 보아 결합재 토출 전후에 제지애시와의 반응으로 발생하는 수소기체의 양이 매우 적어 강도에 미치는 영향이 크지 않은 것으로 판단된다.

Figure 8은 NaOH를 첨가한 경화체의 첨가율에 따른 압축강도를 나타낸 것으로 첨가율 2.5%인 경화체의 압축강도가 9.2MPa로 가장 큰 강도발현을 하였고, 첨가율 12.5%를 전환점으로 첨가율에 따라 강도가 증가하는 경향을 나타내었으며, KOH를 첨가한 경화체의 압축강도 경향과 반응시간이 유사하나 첨가율 변화에 따른 강도발현 차이는

NaOH를 첨가한 경화체가 KOH를 첨가한 경우보다 큰 것으로 나타났다. 이는 NaOH가 KOH보다 이온화도가 빠르고 고로슬래그와의 반응 또한 빠르기 때문에 응결시간이 짧아져 나타난 결과인 것으로 판단된다.

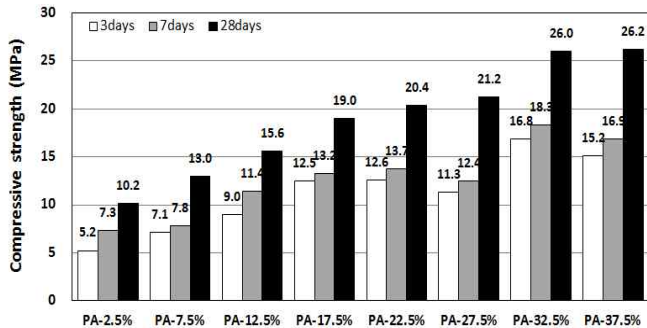


Figure 7. Compressive strength according to addition ratios of Ca(OH)₂

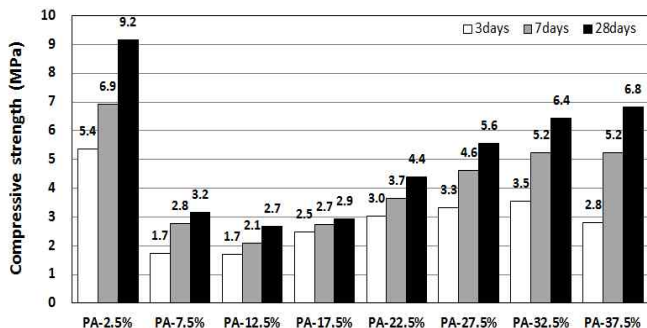


Figure 8. Compressive strength according to addition ratios of NaOH

5. 결론

고로슬래그 기반 결합체에 의한 경량패널의 심재와 충전재를 개발하기 위하여 알칼리 자극제의 종류 및 첨가율에 따른 무시멘트 경량 경화체의 밀도와 강도특성을 분석한 결과, 본 연구의 범위 내에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 밀도 시험결과, 각각의 알칼리 자극제 별 가장 낮은 겉보기 밀도를 나타낸 경화체는 KOH의 경우 첨가율 17.5%의 겉보기 밀도 1.13g/cm³, 감소율 40.61%이며, Ca(OH)₂는 첨가율 2.5%의 겉보기 밀도 1.74g/cm³, NaOH는 첨가율 12.5%의 겉보기 밀도 1.13g/cm³, 감소율 40.45%로 겉보기 밀도와 감소율을 고려하였을 때, NaOH를 사용하였을 경우가 비교적 소량 사용하였을 때 가장 낮은 겉보기 밀도를 나타내었다.

- 2) 압축강도 시험결과는 겉보기 밀도의 증감에 따라 강도 또한 이와 비례하는 경향을 나타내었다. 알칼리 자극제의 종류별 가장 낮은 겉보기 밀도를 갖는 경화체의 재령 28일의 압축강도는 KOH의 경우 3.0MPa이며, Ca(OH)₂는 10.2MPa, NaOH를 첨가한 경화체는 2.7MPa로 나타났다.

이상의 결과로, 시멘트를 전혀 사용하지 않고 고로슬래그, 제지애시 및 알칼리 자극제만으로 경량 패널의 심재와 충전재 등으로 사용할 수 있는 경화체의 제조가 가능하고, 고로슬래그와 제지애시를 사용한 무시멘트 경량 경화체에 가장 적합한 알칼리 자극제와 그 첨가율은 NaOH이며, 첨가율 12.5%인 것으로 판단된다. 또한, 강 알칼리인 알칼리 자극제의 사용으로 인한 시공성과 안전성, 경제성을 고려하여 알칼리 자극제를 대체할 수 있는 재료를 강구해야 할 것이다.

요 약

본 연구는 포틀랜드 시멘트를 사용하지 않고 산업부산물인 고로슬래그를 기반으로 제지애시와 알칼리 자극제를 사용하여 기포를 발생시킴으로써 경량 패널의 심재 및 충전재 등에 사용할 수 있는 무시멘트 경량 경화체를 개발하고자 하였다. 이를 위하여 먼저 제지애시의 적정 치환율을 도출하기 위한 기초실험을 실시하였다. 기초 실험을 바탕으로 제지애시와 반응하여 수소기체를 발생시킬 수 있는 알칼리 자극제의 종류 및 첨가율에 따라 본 실험을 실시하였으며, 제조된 시험체를 대상으로 재령별 겉보기 밀도와 강도를 측정하였다.

그 결과 제지애시의 적정 치환율은 5%이며, 알칼리 자극제는 NaOH를 12.5% 첨가한 경화체의 겉보기 밀도가 1.13g/cm³, 감소율 40.45%로 가장 낮은 겉보기 밀도를 나타내었으며, 겉보기 밀도와 비교하여 비교적 높은 강도를 발현하였다.

따라서, 알칼리 자극제로써 NaOH를 적정량 사용하고 제지애시와의 반응시간을 늦출 수 있는 방법을 강구한다면 보다 높은 강도와 경량성을 겸비한 무시멘트 경량 경화체를 제조할 수 있을 것으로 판단된다.

키워드 : 고로슬래그, 제지애시, 알칼리 자극제, 경량 경화체

Acknowledgement

This research was supported by a grant(12 CTAP D01) from Construction & Transportation Technology Advancement Research Program funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government

References

1. Jeong JY, Properties of foamed concrete according to using methods and types of foaming agent [dissertation], [Kongju (Korea)]: Kongju National University; 2012. 137 p.
2. Hwang JP, Jin SH, Ann KY, Estimation of CO₂ emission with raw materials and energy sources. Proceeding of the Korea Concrete Institute conference; 2011 Nov 9–11; Pyeongchang, Korea, Seoul (Korea): Korea Concrete Institute; 2011. p. 785–6.
3. Park SG, Kwon SJ, Kim YM, Lee SS, Reaction properties of non-cement mortar using ground granulated blast furnace slag. Journal of the Korea Contents Association. 2013 Sep;13(9):392–9.
4. Kim YS, Moon DI, Lee DW, An experiment study on alkali-silika reaction of alkali activated ground granulated blast furnace slag mortars. Journal of the Korea Institute of Building Construction, 2011 Aug;11(4):345–52.
5. So HS, Janchivdorj K, Yi JB, Jang HS, So SY, Strength and microstructure of reactive powder concrete using ternary pozzolanic materials. journal of the Korea Institute of building Construction, 2013 Feb;13(1):48–57.
6. Lim MH, Lee JG, Nam SY, Ann JH, Paper sludge recycling technology for process sustainable of paper industry. Ceramist, 2013 Sep;16(3):7–14.
7. Lee YS, Lee SS, Song HY, Strength properties according to the conditions of low carbon inorganic composite using industrial by-product. journal of the Korea institute of building construction, 2012 Feb;12(1):54–63.